



Mesure de masse volumique de matériaux par rayons X pour le génie civil

Noël Servagent, Charbel Koumeir, Vincent Métivier

► To cite this version:

Noël Servagent, Charbel Koumeir, Vincent Métivier. Mesure de masse volumique de matériaux par rayons X pour le génie civil. 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2016, Saint-Nazaire, France. hal-01280178

HAL Id: hal-01280178

<https://hal.science/hal-01280178>

Submitted on 29 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesure de masse volumique de matériaux par rayons X pour le génie civil

Noel Servagent¹, Charbel Koumeir^{1,2}, Vincent Métivier¹, Fériid Haddad^{1,2}, Nicolas Varmenot^{2,3}, Julien Bonal⁴, Willy Bouchet⁴, Nathalie Boutet⁴, Radoine Dik⁴, Jacky Gaschet⁴, Jean-Noel Gaudin⁴, Florian Greffier⁴, Laurent Laguerre⁵, Vincent Lemasson⁴, Rosala Pascal⁴, Frank Pilniere⁴, Jean-Claude Robert⁴

¹SUBATECH Nantes, Ecole des Mines de Nantes, UMR6457, 44307 NANTES, France

²GIPARRONAX, Saint Herblain, France

³Institut de Cancérologie de L'Ouest (ICO-R. Gauducheau), Saint Herblain, France

⁴CEREMA 2 bis, avenue Général Foy, 49100 Angers, France

⁵IFSTTAR-Nantes Route de Bouaye, 44344 Bouguenais, France

noel.servagent@subatech.in2p3.fr

Abstract Density Measurement of civil engineering materials with X rays

This study shows the feasibility of measuring the density of a material with an X-ray generator. X-rays are detected in transmission, with a shielded and collimated scintillator. The first measurements were made with homogeneous limestone and aluminium plates. An algorithm has also been developed to determine from the detected photons, the density of the material. The density was resolved with a good accuracy (<5%). The chemical composition was also determined but with lower accuracy (10%).

1. Introduction

Les techniques les plus utilisées pour évaluer la compacité des chaussées relèvent actuellement du domaine de la gamma-densimétrie [1]. Cependant l'évolution des réglementations concernant les sources radioactives rend aujourd'hui leur emploi en conditions industrielles de plus en plus difficile [2]. Afin d'éliminer les contraintes inhérentes au transport, au stockage, à l'administration des sources gamma, nous proposons une technique novatrice basée sur l'utilisation des générateurs à rayons X.

2. Interaction rayon X – matière

2.1 Mécanisme d'interaction

Les rayons X que nous considérerons dans la cadre de la mesure de densité des chaussées ont des énergies à 200keV et dans ce cas les mécanismes d'interactions de type effet photo-électrique et effet Compton sont prépondérants [3].

2.1 Sections efficaces

2.1.1 Effet photo-électrique

Nous proposons une formulation approchée en Z^n (Z : numéro atomique et n : un paramètre) de la section efficace corrigée pour des énergies proches des bandes K donnée par Léo W.R. [4]. Son domaine de validité sera sur une étendue de Z restreinte centrée en Z_0 et pour des énergies incidentes des photons E proches de E_0 préalablement fixée.

$$\sigma_K = 8\pi\alpha^5 \sigma_{Th} \frac{f_K}{K^4} Z^n = K(E) Z^n \quad (1)$$

$$\text{avec: } n = 6 + \alpha Z_0 \sqrt{\frac{2}{K_0}} \left(\frac{\pi}{1 - \exp(-\pi\alpha Z_0 \sqrt{\frac{2}{K_0}})} - 2 \arccot \frac{\alpha Z_0}{\sqrt{2K_0}} \right);$$

$$f_K = \frac{\exp(-2\alpha Z_0 \sqrt{\frac{2}{K}} \arccot \frac{\alpha Z_0}{\sqrt{2K}})}{(1 - \exp(-\pi\alpha Z_0 \sqrt{\frac{2}{K}}))} Z_0^{6-n}; \quad \sigma_{Th} = \frac{8}{3} \pi r_0^2 \text{ et } \begin{cases} K = E / m_0 c^2 \\ K_0 = E_0 / m_0 c^2 \end{cases}$$

Où : $\alpha \cong 1/137$ est la constante de structure fine, σ_{Th} : la section efficace de diffusion Thomson, r_0 : rayon classique de l'électron, m_0 : la masse de l'électron au repos et c : la vitesse de la lumière.

Pour le numéro atomique moyen : $Z_0=13$ des matériaux constituant les chaussées sauf l'hydrogène ($6 \leq Z \leq 20$) et pour l'énergie basse choisie pour la mesure expérimentale de densité de matériaux $E_0=100\text{keV}$ (§4.2), on obtient $n=4.54$.

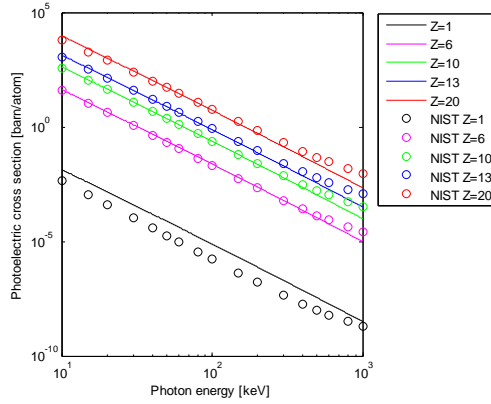


Figure 1 : Section efficace photo-électrique.

La figure 1 montre la comparaison entre la section efficace théorique (1) et les données de référence NIST [5]. L'écart le plus significatif apparaît pour l'hydrogène dont l'interaction avec les rayons X à $E_0=100\text{keV}$ reste faible (longueur de demi atténuation hydrogène - 262°C : $\sim 33\text{cm}$).

2.1.1 Effet Compton

La section efficace totale Compton par atome [6], obtenue en intégrant la formule de Klein-Nishina sur l'angle solide total 4π [sr], apparaît proportionnelle au numéro atomique (Z).

$$\sigma_c = Z 2 \pi r_0^2 \left\{ \left[\frac{1 + \kappa}{\kappa^2} \right] \left[2 \frac{(1 + \kappa)}{1 + 2 \kappa} - \frac{\ln(1 + 2 \kappa)}{\kappa} \right] + \frac{\ln(1 + 2 \kappa)}{2 \kappa} - \frac{1 + 3 \kappa}{(1 + 2 \kappa)^2} \right\} = C(E). Z \quad (2)$$

Où $C(E)$ est appelée section efficace Compton par électron.

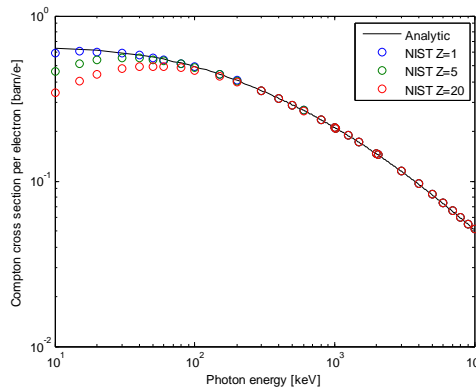


Figure 2 : Section efficace Compton.

La figure 2 montre la comparaison entre la section efficace Compton théorique (2) par électron et les données de référence NIST [5]. La section efficace analytique Compton (2)

apparaît imprécise aux basses énergies $E < 100 \text{ keV}$. Cependant pour ces énergies l'effet photo-électrique est prépondérant.

2.2 Absorption massique

Dans le cas d'un revêtement de chaussée, le matériau est constitué d'un mélange de matériaux élémentaires du tableau périodique de numéro atomique Z_m avec une concentration atomique $n_{Vm} [\text{cm}^{-3}]$. L'atténuation linéique de ce mélange (μ) est la somme pondérée de ces concentrations atomiques par les sections efficaces respectives (σ_m) pour les deux processus d'interaction photo-électrique et Compton. Ainsi l'absorption massique est définie comme le rapport de l'atténuation linéique par la masse volumique (ρ) du mélange comme suit :

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \sum_m n_{Vm} \sigma_m \quad \text{avec : } \sigma_m = \sigma_{Cm} + \sigma_{Km} \quad (3)$$

2.3 Numéro atomique effectif et masse molaire effective

Nous définissons le numéro atomique effectif (Z_{eff}) et la masse molaire effective (M_{eff}) d'un mélange comme le numéro atomique et la masse molaire d'un matériau élémentaire fictif tel que son absorption massique soit égale à celle du mélange quelle que soit l'énergie des photons X. Cette définition se traduit à l'aide de (3) par :

$$\frac{1}{M_{\text{eff}}} \cdot (C(E) \cdot Z_{\text{eff}} + K(E) \cdot Z_{\text{eff}}^n) = \frac{1}{M} \sum_m \frac{n_{Vm}}{n_V} (C(E) \cdot Z_m + K(E) \cdot Z_m^n) \quad (4)$$

Où M : est la masse molaire du mélange et n_V : la concentration atomique du mélange.

La relation précédente sera vérifiée quelle que soit l'énergie des photons E pour les valeurs du numéro effectif Z_{eff} et la masse molaire effective M_{eff} suivantes :

$$Z_{\text{eff}} = \left(\frac{\sum_m n_{Vm} Z_m^n}{\sum_m n_{Vm} Z_m} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad \text{et} \quad M_{\text{eff}} = \frac{\left(\sum_m n_{Vm} Z_m^n \right)^{\frac{1}{n-1}}}{\left(\sum_m n_{Vm} Z_m \right)^{\frac{n}{n-1}}} M \quad (5)$$

2.4 Atténuation linéique effective

Tenant compte du facteur géométrique (ξ_i [1]) en raison du fait que le détecteur n'est pas ponctuel, l'atténuation linéique effective d'un matériau pour une énergie des photons E_i est

donnée par : $\alpha_i = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \rho \xi_i$. A l'aide de (3), on explicite la dépendance de cette

atténuation avec la nature chimique du matériau ($Z_{\text{eff}}, M_{\text{eff}}$) et sa masse volumique (ρ) sous la forme :

$$\alpha_i = n_{eV} (C_i + K_i \cdot Z_{\text{eff}}^{n-1}) \xi_i \quad (6)$$

$$\text{avec } C_i = \xi_i \cdot C(E_i) ; K_i = \xi_i \cdot K(E_i) \text{ et } n_{eV} = \frac{\rho}{M_{\text{eff}}} N_{\text{Av}} Z_{\text{eff}}$$

Où $n_{eV} [\text{cm}^{-3}]$: est la concentration électronique du matériau et N_{Av} : le nombre d'Avogadro.

2.5 Flux de photons détecté

Le flux de photons X détecté en transmission (Φ_i) pour une énergie E_i est donné pour un mélange par la relation :

$$\Phi_i = \Phi_{i0} \exp(-\alpha_i z) \quad (7)$$

Où Φ_{i0} est le flux initial détecté à l'énergie E_i , α_i : l'atténuation linéique effective associée et z : l'épaisseur de matériau traversée par le flux de photon.

3. Problème inverse

3.1 Introduction

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté le problème direct de l'interaction rayonX-matière en explicitant le flux de photons détectés (Φ_i) connaissant les caractéristiques du matériau soumis à l'excitation RX. Ces caractéristiques sont de type nature chimique, par le couple numéro atomique effectif et masse molaire effective ($Z_{\text{eff}}, M_{\text{eff}}$) et de type physique, par sa masse volumique (ρ). Le problème inverse consiste à déterminer à partir du flux de photons détectés, la nature chimique et la masse volumique du matériau.

3.2 Principe d'inversion

En considérant trois matériaux de référence repérés « a », « b » et « c » dont la nature chimique et les masses volumiques sont connues, on obtient à partir de l'expression du flux de photons détectés (7) pour deux énergies rayon X : E_1 et E_2 , les jeux de flux normalisés (f):

$$\begin{cases} f_{1/2ab} = (n_{eVa} z_a - n_{eVb} z_b) C_{1/2} + (n_{eVa} z_a Z_{\text{eff}.a}^{n-1} - n_{eVb} z_b Z_{\text{eff}.b}^{n-1}) K_{1/2} \\ f_{1/2ac} = (n_{eVa} z_a - n_{eVc} z_c) C_{1/2} + (n_{eVa} z_a Z_{\text{eff}.a}^{n-1} - n_{eVc} z_c Z_{\text{eff}.c}^{n-1}) K_{1/2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{avec : } f_{1/2ab} = \ln\left(\frac{\Phi_{1/2b}}{\Phi_{1/2a}}\right) \text{ et } f_{1/2ac} = \ln\left(\frac{\Phi_{1/2c}}{\Phi_{1/2a}}\right)$$

Où f_{1ab} , f_{1ac} , f_{2ab} et f_{2ac} : sont les flux de photons détectés normalisés de référence, z_a, z_b, z_c : les épaisseurs des matériaux de références, $Z_{eff,a}, Z_{eff,b}, Z_{eff,c}$: leurs numéros atomiques effectifs et n_{eVa} , n_{eVb} , n_{eVc} : leurs concentrations électroniques.

De manière identique, les flux de photons normalisés du matériau inconnu par rapport au matériau de référence « a » pour les deux mêmes énergies E_1 et E_2 s'écrivent:

$$f_{1/2a} = (n_{eVa} z_a - n_{eV} z) C_{1/2} + (n_{eVa} z_a Z_{eff,a}^{n-1} - n_{eV} z Z_{eff}^{n-1}) K_{1/2} \quad (9)$$

$$\text{avec } f_{1/2a} = \ln\left(\frac{\Phi_{1/2}}{\Phi_{1/2a}}\right)$$

Où f_{1a} , f_{2a} : sont les flux de photons détectés normalisés du matériau inconnu.

La résolution numérique du système linéaire (8) conduit aux valeurs des coefficients $C_{1/2}$ et $K_{1/2}$ à condition que le déterminant de la matrice du système homogène associé (M) soit non nul, ce qui se traduit par:

$$\det(M) = z_a z_b n_{eV,a} n_{eV,b} (Z_{eff,b}^{n-1} - Z_{eff,a}^{n-1}) + z_a z_c n_{eV,a} n_{eV,c} (Z_{eff,a}^{n-1} - Z_{eff,c}^{n-1}) + z_b z_c n_{eV,b} n_{eV,c} (Z_{eff,c}^{n-1} - Z_{eff,b}^{n-1}) \neq 0 \quad (10)$$

Cette condition montre que le principe d'inversion proposé n'est pas applicable dans le cas du choix de trois matériaux de référence de même nature chimique puisque dans ce cas leurs numéros atomiques effectifs sont identiques (Z_{eff}) et qu'ainsi trivialement : $\det(M)=0$.

Connaissant les coefficients $C_{1/2}$ et $K_{1/2}$, la résolution du système (9) permet de déterminer le numéro atomique effectif (Z_{eff}) et la concentration électronique (n_{eV}) du matériau inconnu.

$$Z_{eff} = \left(\frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{A_2 K_1 - A_1 K_2} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad \text{et} \quad n_{eV} = \frac{A_1}{z \cdot (C_1 + K_1 Z_{eff}^{n-1})} \quad (10)$$

$$\text{avec } A_{1/2} = C_{1/2} z_a n_{eVa} + K_{1/2} z_a n_{eVa} Z_{eff,a}^{n-1} - f_{1/2a}$$

De cette valeur de numéro atomique effectif et par une étude préalable répertoriant les couples (Z_{eff} , M_{eff}) : numéro atomique effectif et masse atomique effective des matériaux de revêtement de chaussées les plus probables, la masse atomique effective du matériau inconnu M_{eff} sera évaluée par interpolation. Ainsi à cette étape, la nature chimique du matériau étudié est déterminée. Reste à définir sa nature physique liée au compactage de la chaussée qu'est sa masse volumique à l'aide de (6):

$$\rho = \frac{n_{ve} M_{eff}}{N_{Av} Z_{eff}} \quad (11)$$

Ainsi à l'aide de trois matériaux de référence et d'une courbe de calibration donnant la masse molaire effective en fonction du numéro atomique effectif des matériaux de revêtement de chaussée courants, le problème inverse consistant à déterminer la nature chimique et la nature physique d'un matériau inconnu de revêtement de chaussées est résolu.

4. Résultats expérimentaux

4.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de mesure par transmission est constitué de trois parties distinctes : un générateur X d'énergie et d'intensité réglables respectivement de 70 à 200keV et de 1 à 8 mA (CEGELEC SITE X200 D2008), d'un détecteur scintillateur NaI blindé, collimaté (BICRON monoline 2M2/2) et de l'échantillon de matériau d'épaisseur z . L'ensemble est placé à l'intérieur d'une cabine de radioprotection. Les flux de photon détectés Φ_i $i=\{1,2\}$ seront mesurés dans une bande étroite d'énergie centrée en $E_1=105\text{keV}$ [100-110keV] et $E_2=181\text{keV}$ [173-189keV].

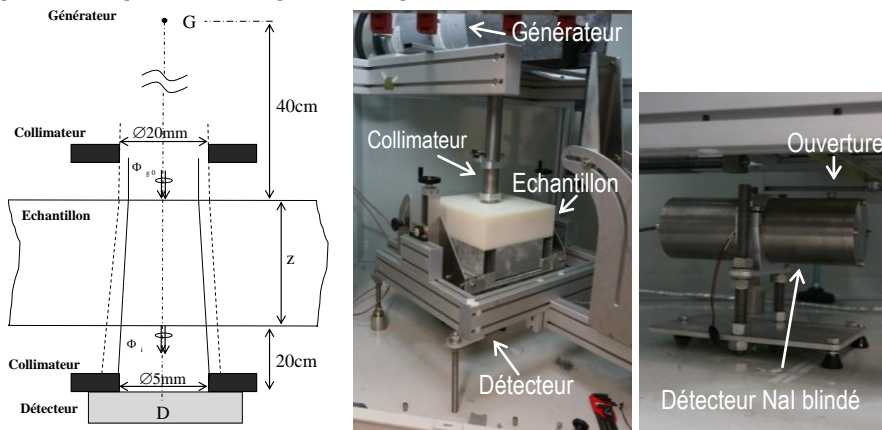


Figure 3 : Dispositif expérimental par transmission.

4.2 Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques des échantillons tests à disposition sont regroupées dans le tableau ci-dessous. Les matériaux autres que l'aluminium sont considérés comme essentiellement constitués de calcite (CaCO_3) dont le numéro effectif et masse molaire effective sont calculés par application de (5). Les épaisseurs ont été mesurées indirectement par un banc Gamma et les fenêtres de flux de photon hautes et basses énergies choisies de manière arbitraire en évitant les zones spectrales bruitées par les matériaux constituant le dispositif expérimental.

(blindage, collimateurs, dégradeurs). L'échantillon d'aluminium étant faiblement allié (aluminium pour construction mécanique) sa masse volumique apparait légèrement supérieure à celle de l'aluminium pur de 3.7%. D'autre part, nous approximations sa nature chimique par celle de l'aluminium pur ($Z=13$).

Dénomination :	Aluminium (Alu)	Balzac (Bal)	Massengis (Mas)	Tervou (Terv)	Sabastopol (Sab)
N°répère	(1)	(2)	(3)	(4)	5
Numéro atomique (effectif @ $n=4.54$)	13	15.66	15.66	15.66	15.66
Masse atomique [g/mol] (effective @ $n=4.54$)	26.98	31.34	31.34	31.34	31.34
Epaisseur z [cm]	10	9.75	10.3	9.8	9.2
Masse volumique [g/cm ³]	2.8	2.624	2.3	2.092	1.62
Flux de photon sur fenêtre $E_1=100-110\text{keV}$ [cps]	8,646	10,72	15,251	26,038	74,349
Flux de photon sur fenêtre $E_2=172.9-189\text{keV}$ [cps]	11.528	12.275	14.404	21.403	43.760

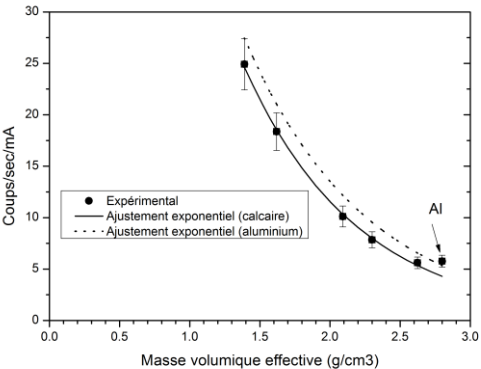


Figure 3 : variation du taux de comptage, pour les photons d'énergie entre 173-189keV, en fonction de la masse volumique effective

La figure 3 présente la variation du taux de comptage en fonction de la masse volumique effective. Les points correspondent aux mesures expérimentales avec des échantillons de calcaire et en aluminium (le dernier point). Les incertitudes sur la mesure sont de l'ordre de 10%, elles incluent les fluctuations statistiques du taux de comptage, la répétabilité et les erreurs de la chaine de mesure. La courbe, en trait continu, correspond à un ajustement exponentiel pour les points en calcaire. Cet ajustement montre que ces points expérimentaux se comportent suivant la loi donnée par l'équation (7). Cet ajustement peut être utilisé comme une courbe d'étalonnage pour déterminer la masse volumique des échantillons de calcaire. Le point correspondant à l'aluminium se trouve hors de cette courbe. En effet, l'aluminium est de nature chimique différente que le calcaire avec une Z_{eff} plus petite, les photons d'énergie [173-189keV] ont une probabilité non négligeable d'interagir suivant le processus photo-électrique (dépendant de la nature chimique), donc, d'après l'équation (1), le taux de comptage sera plus élevé avec un échantillon en aluminium qu'en calcaire pour une même

densité. La courbe en pointillée est obtenue à partir de l'ajustement décrit ci-dessus en corrigeant le paramètre dans l'exponentiel par le rapport des coefficients de l'atténuation linéique effective de l'aluminium et du calcaire. Le taux de comptage expérimental de l'aluminium passe bien par cette courbe. Cela montre, en corrigeant la nature chimique, la courbe d'étalonnage, déterminée par des échantillons de calcaire, peut être appliquée pour retrouver la masse volumique d'un échantillon d'une nature chimique différente.

Dans le cas où la nature chimique de l'échantillon n'est pas connue, nous avons développé un algorithme, basé sur le principe d'inversion décrit dans la partie 3, pour déterminer la masse volumique.

L'algorithme d'inversion nécessitant l'interpolation d'une courbe de calibration de numéros atomiques effectifs en fonction de masses molaires effectives, nous utiliserons comme nœuds d'interpolation les valeurs obtenues par application de (5) aux éléments chimiques suivants : C ;SiO₂ ;Al ;Si ;CaCO₃ ;S et Ca, couvrant ainsi la gamme des numéros atomiques les plus courants des éléments constituant les matériaux de revêtements de chaussées.

4.3 Application de l'algorithme d'inversion

Afin d'exploiter au mieux les cinq matériaux tests à disposition, nous avons défini l'ensemble des combinaisons entre matériaux de référence et matériaux à résoudre, adaptées à notre algorithme d'inversion. Ces combinaisons sont contraintes par le fait que l'algorithme nécessite trois matériaux de références dont deux de nature chimique différente. L'aluminium étant le seul matériau de nature chimique différente des quatre autres, nous obtenons douze combinaisons pour tester l'algorithme d'inversion. Ces dernières sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Référence (a)	Référence (b)	Référence (c)	Matériau à résoudre	Numéro atomique effectif obtenu	Erreur numéro atomique effectif [%]	Masse volumique obtenue [g/cm ³]	Erreur Masse volumique [%]
(1)Alu	(2)Bal	(3)Mas	(4)Terv	17.94	14.5	2.106	0.67
(1)Alu	(2)Bal	(3)Mas	(5)Sab	27.24	74.0	1.470	-9.3
(1)Alu	(2)Bal	(4)Terv	(3)Mas	17.46	11.5	2.282	-0.80
(1)Alu	(2)Bal	(4)Terv	(5)Sab	10.96	-30.0	1.604	-0.97
(1)Alu	(2)Bal	(5)Sab	(3)Mas	17.58	12.3	2.283	-0.72
(1)Alu	(2)Bal	(5)Sab	(4)Terv	16.54	5.6	2.112	0.98
(1)Alu	(3)Mas	(4)Terv	(2)Bal	14.39	-8.1	2.656	1.2
(1)Alu	(3)Mas	(4)Terv	(5)Sab	16.81	7.3	1.558	-3.8
(1)Alu	(3)Mas	(5)Sab	(2)Bal	14.42	-7.9	2.653	1.1
(1)Alu	(3)Mas	(5)Sab	(4)Terv	15.32	-2.2	2.127	1.7
(1)Alu	(4)Terv	(5)Sab	(2)Bal	14.76	-5.7	2.625	0.06
(1)Alu	(4)Terv	(5)Sab	(3)Mas	16.22	3.6	2.263	-1.6

Tableau 1 : Résultats expérimentaux.

Sur l'ensemble des combinaisons d'inversion testées, 10/12=83% montrent une résolution inférieure à 2% sur la masse volumique et 7/12=58% une résolution en numéro atomique effectif inférieure à 10%. Les meilleurs résultats sont obtenus, lorsque la masse volumique du matériau à résoudre se retrouve dans la gamme des masses volumiques des

échantillons choisis comme référence. Dans ce dernier cas, la précision obtenue sur la masse volumique (2%) est inférieure à celle obtenue avec la gamma-densimétrie (1%).

Plusieurs raisons peuvent être avancées pour expliquer ce résultat, comme l'imprécision du modèle de la section efficace photoélectrique en $K(E)Z^n$ (cf. §2.1.1), les flux de photons expérimentaux moyennés sur des fenêtres d'énergie trop étendues (10keV@E₁ et 16keV@E₂), des imprécisions de mesures, des dérives en intensité du générateur entre chaque acquisitions induisant des erreurs sur la normalisation des flux et une connaissance imprécise de la nature chimique des matériaux constituant les échantillons (notamment pour l'aluminium).

5. Conclusion

Les premiers résultats expérimentaux ont montré la faisabilité de la mesure de la masse volumique et, avec une moindre précision, de la nature chimique des matériaux de revêtement de chaussée par une technique à rayon X en transmission. Une étude plus approfondie de la méthode utilisant des matériaux de compositions chimiques référencées devra confirmer la précision des mesures par cette méthode et son positionnement comme alternative au banc Gamma. Une amélioration de la chaîne de mesure (génératrice + détecteur) est nécessaire pour réduire les incertitudes durant les expériences. Cette même technique en configuration rétrodiffusion, donc avec générateur et détecteur RX du même côté du matériau permettant une analyse non intrusive in situ est en cours d'étude.

Remerciements

Nous remercions les différentes équipes du laboratoire CEREMA/Angers de leur disponibilité pendant la réalisation des mesures. Nous leur remercions également pour la préparation et la caractérisation des échantillons.

Bibliographie

- [1] Belin J.P., Peybernard J., Fouard J. C., Radioisotopes2, Bul. Lab. Ponts & Chauss., (1970)
- [2] AIEA, Règlements pour la sûreté du Transport des Matières Radioactives, Edition 1996
- [3] Chevalier P. : Interaction du rayonnement avec la matière. Techniques de l'ingénieur A214-1:22, 1986
- [4] Léo W.R. Techniques for nuclear and particle physics experiments. Springer Verlag. 2nd revised edition, 1994
- [5] <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2>
- [6] Leroy C., Rancoita P.G.: Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection. World Scientific Publishing, 3rd edition, 2012.